

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04121

研究課題名(和文) 虚数部のインダクション・ベクトルに関する研究

研究課題名(英文) A study of the quadrature phase induction vector

研究代表者

市来 雅啓 (Ichiki, Masahiro)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：80359182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は地殻・マンツルの電気伝導度と虚部のインダクションベクトルの関係を研究した。2次元構造における海陸境界と地殻・マンツルの高伝導体では虚部のインダクションベクトルは表皮深度に対応して海水や高伝導体の方向を指向し、構造の特徴を良く反映する。しかし、陸地が海域に囲まれるような3次元構造では、虚部のインダクションベクトルは短周期だと海域を、長周期だと陸地の中心を中間周期では、海陸境界に平行な方向をそれぞれ指向する。東北地方の観測による周期5000～10000秒の北向き虚部のインダクションベクトルは北海道西部の最上部マンツル付近に高抵抗のブロックを置くと説明できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部の電磁誘導研究において虚部のインダクションベクトルの海洋効果、海岸線効果などの海陸境界、海底地形の影響をモデリングによって具体的特徴を明らかにしたことは地球内部の比抵抗構造を研究する上で学術的な意義は非常に大きい。作業仮説では実際の東北地方の虚部のインダクションベクトルの特徴は北海道西部の最上部マンツルの高伝導体に原因があると考えていたが、実際は高抵抗の可能性が高いことが示唆されたことは、今後新しいマンツルテクトニクスの解明に繋がる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：This study revealed the following relationship between quadrature-phase induction arrow and the electrical resistivity distribution in the crust and uppermost mantle. In the two-dimensional settings, the quadrature-phase induction vector points seawards or a conductive body in the crust and uppermost mantle depending on the skin depth, and the quadrature-phase vector well indicates the ocean and the conductor in the earth. In the three-dimensional setting such as an isolated island surrounded by ocean, quadrature-phase induction vector points seawards in shorter periods, subparallel to coastline in middle periods, and inland in longer periods. The observed quadrature-phase induction vector in northeastern Japan in the period range 5000 to 10000 seconds, which points northwards, is likely ascribed to the resistive block rather than the conductive block in the uppermost mantle beneath the eastern part of Hokkaido.

研究分野：地球惑星内部電磁気学

キーワード：インダクションベクトル 電磁誘導 海洋効果 海岸線効果

## 1. 研究開始当初の背景

地殻・上部マントルの流体や水は地球内部のダイナミクスと地震発生や火山分布に重要な役割を果たす。地殻・上部マントル中の流体や水の分布の推定には、地球内部の電気伝導度構造が有力な情報を与える。地球内部の電気伝導度構造の観測指標の代表に、地磁気変換関数(インダクション・ベクトル)がある。地表で観測される地磁気時間変化の水平成分と鉛直成分の周波数応答関数であるインダクション・ベクトルは、周波数に対応する地下深さの高電気伝導体が観測場所から見てどの方位に存在するかを指す地図上のベクトルである。周波数応答実部のインダクション・ベクトルは物理的意味づけが分かり易く、1950年代以降盛んに観測や研究が行われてきた。しかし地殻・上部マントルに対応する周波数に比べごく表層の不均質に大きく影響され、地殻・上部マントルの電気伝導度分布に関する情報を誤認識させる欠点が明らかになっている。例えば深さ100 km以上に対応する周波数でも、海洋や海峡の方向を指し続けることが観測から示されている。一方虚部のインダクション・ベクトルについては物理的な意味が分かり難いが、観測事実としては海洋分布に無相関で地質構造と非常によく対応するらしいことが1976年のイギリス・ブリテン島の研究で報告されている。ところが1980年代前半に同様の観測結果が2つ示されて以降、虚部のインダクション・ベクトルに関する研究は殆んど行われていない。我々は2014年度から2018年度の新学術研究領域において、青森県と岩手・秋田両県の県境付近の虚部のインダクション・ベクトルが軒並み長周期で北側の津軽海峡方向を指す結果を得た。イギリスでの観測結果を基にすると、津軽海峡付近の海溝軸が湾曲する直下の上部マントル付近に高電気伝導体が存在する可能性を示唆するものである。本研究課題では、2000年以前に比べ、近似のない3次元比抵抗構造での電磁誘導シミュレーションコードが実用的になったことを踏まえ、フォワード・モデリングによる虚部のインダクション・ベクトルへの海の影響等の基本的な物理素過程を調べる研究を計画した。

## 2. 研究の目的

(1) 海洋、大陸、地球内部の高伝導体を模した単純な電気伝導度構造モデルでの電磁場の数値計算から、虚部のインダクション・ベクトルの振舞いがどこに最も対応しているかをシミュレーションで明らかにする。

(2) 現実的モデルである実際の海底地形と日本列島や大陸の海陸分布を模した電気伝導度構造での電磁場数値計算によって、東北地方で得られている虚部のインダクション・ベクトルの観測結果が上部マントルの電気伝導度異常の原因で説明できるかフォワード・モデリングで確かめる。

## 3. 研究の方法

(1) 平坦な海底と陸地で構成された単純な海陸分布と陸地の下の高伝導度からなる2次元モデルで、虚部のインダクション・ベクトルがどのような振る舞いをするか調べる。比較のために、実部のインダクション・ベクトルの振舞いも調べる。

(2) 基本となる3次元モデルとして周辺を海に囲まれているような離島を模したモデルで、海底の深さを変化させた場合に、計算で求められる虚部のインダクション・ベクトルが周波数によってどのように変化するかをシミュレーションで明らかにする。

(3) 東北地方をモデルの中心に置いて、実際の海底地形と日本列島、大陸等を模したモデルでのシミュレーションを行う。地殻や上部マントルの電気伝導度不均質を考えずに、海底地形・海水の効果のみで陸上で観測される虚部のインダクション・ベクトルがどのような分布になるのかをシミュレーションで調べる。

(4) (3)の結果、海陸分布だけでは東北地方の観測による虚部のインダクション・ベクトル説明できない場合、過去の実部のインダクション・ベクトルの研究を踏まえた地殻・上部マントルの電気伝導度構造を設定して、観測された虚部のインダクション・ベクトルが説明できるかシミュレーションする。それでも説明できない場合は試行錯誤によって観測による虚部のインダクション・ベクトルの特徴を説明する地下の電気伝導度構造の特徴を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 2次元モデルでの海陸分布と陸域下マントルに高伝導体を与えたモデルのシミュレーションでは、虚部のインダクション・ベクトルは、表皮深度とほぼ連動するスケールで海水とマントルの高伝導体の方向を指すことが分かった。実部のインダクション・ベクトルは表皮深度に関係なく長周期まで海洋の方向を指すことを確認した (図1)。

(2) 単純な3次元モデルである長方形の離島を模した海陸分布でのシミュレーションでは、虚部のインダクション・ベクトルは表皮深度が海水を無視できるような長周期では、むしろ離島の中心を指すような放射パターンが得られ、中間の周期帯では離島の海岸線付近で海岸線と平行になるようなパターンを示し、短周期では海洋を指向する放射パターンを示した。実部のインダクション・ベクトルは海洋を指向する放射パターンが一貫して得られた。東北地方で得られているインダクション・ベクトルは虚部と実部のインダクション・ベクトルが約90°異なる方向を指向するが、この傾向を示唆する結果は上記のシミュレーションから得られなかった。

(3) 東北地方をモデルの中心に置いた実際の海底地形や海岸線を考慮したシミュレーション計算は、4面体要素による有限要素法でシミュレーションを実施した。海岸線効果と海洋効果 (海底地形効果) を区別する為、海底深度を500 m, 1500 m, 3000 mそれぞれ一定にして海岸線のみを考慮したモデルと、実際の海底地形も考慮したモデルとでシミュレーション比較を行った。海底深度を一定にして、海岸線効果のみを考慮したシミュレーションでは、虚部のインダクション・ベクトルは、長周期において日本海沿岸、太平洋沿岸で東西方向の内陸を向く対称的パターン、中間周期では三陸沿岸を除いて海岸線に平行な方向を向くパターン、短周期で海側を向く放射パターンを示した (図2)。この結果は、(2) で明らかにした単純な長方形の離島モデルとほぼ調和的であった。海底の深さは、ベクトルの方向はほぼ同じで、振幅を定数倍にする線形効果のみであった。

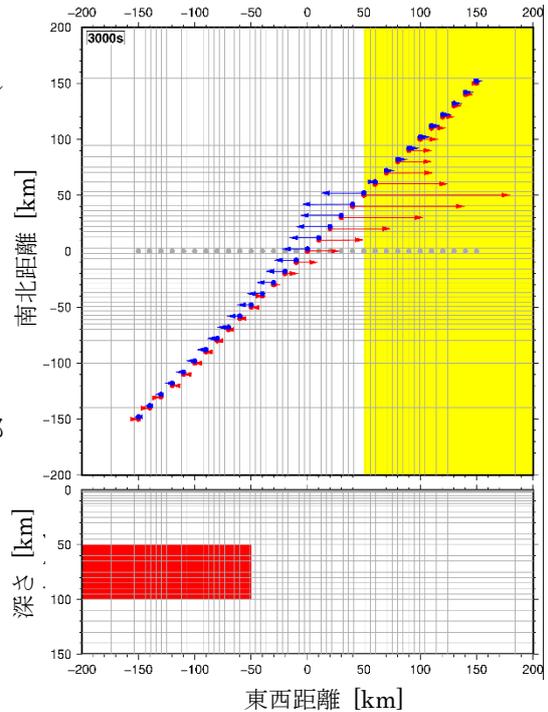


図1 深さ 5000 m 一定の海底 (上図黄色) と地球内部の深さ 50~100 km に高伝導度領域 (1  $\Omega$  m) を入れた 2 次元モデルでの実部 (赤矢印) と虚部 (青矢印) のインダクション・ベクトルの計算結果。高伝導領域以外は 1000  $\Omega$  m、周期は 3000 秒。赤矢印は海方向を向いたままだが、青矢印は高伝導側を向く。

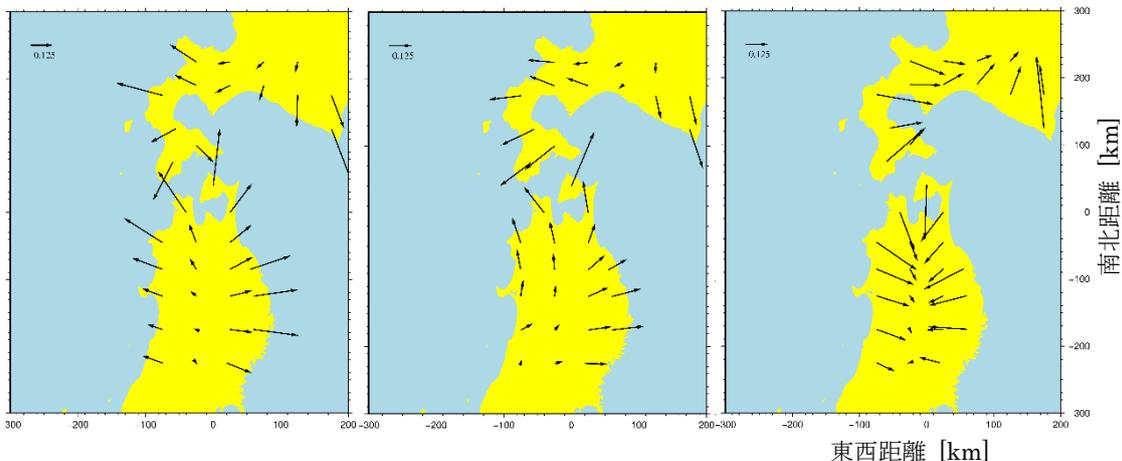


図2 深さ 1500 m 一定の海底と実際の海岸線をモデルにした場合の虚部インダクション・ベクトルのシミュレーション結果。周期は左から 100、300、10000 秒。地球内部の比抵抗は 100  $\Omega$  m。周期 300 秒のインダクション・ベクトルでは日本海沿岸や中央脊梁で海岸線に平行なベクトルが見られる。三陸側では海岸線に平行な特徴は見られなかった。海岸線が湾曲しているためと考えられる。

海岸線と海底地形を考慮したシミュレーションでは、長周期において、東北地方の太平洋側で虚部のベクトルが非常に小さくなり、非対称的パターンを示す結果になった(図3右)。海底地形、特に日本海溝の影響は、地球内部が均質ならば太平洋沿岸の虚部インダクション・ベクトルを殆ど0にする影響を及ぼすことが分かった。また、海底深度を一定にしたシミュレーションで得られていた中間周期で海岸線と平行な北側を指向する特徴は、いずれの周期に於いても実現できず、消失した(図3)。結果的に観測で得られている東北地方北部の虚部インダクション・ベクトルが長周期側で北側を向く傾向は、海洋効果、海岸線効果、海峡効果のいずれでも説明できなかった。

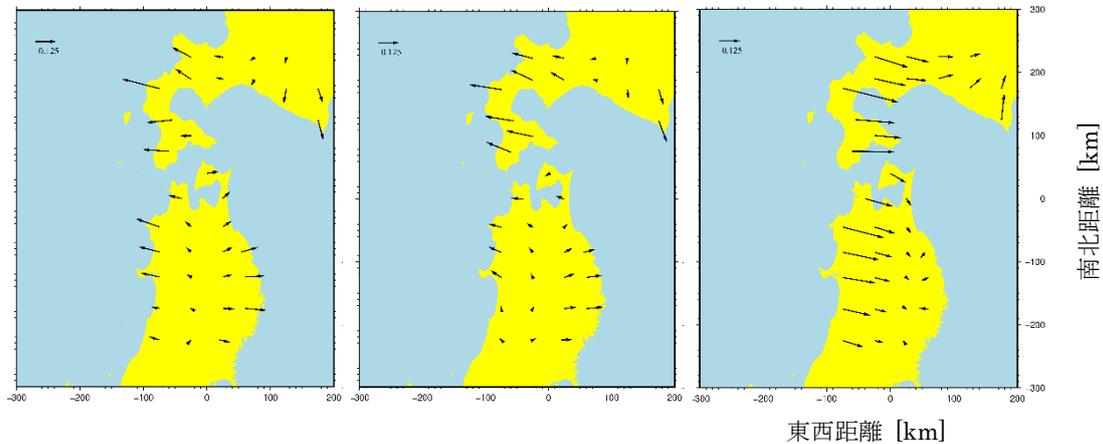


図3 実際の海底地形と海岸線をモデルにした場合の虚部インダクション・ベクトルのシミュレーション結果。周期は左から100、300、10000秒。地球内部の比抵抗は $100 \Omega\text{m}$ 。海底を1500m一定にした場合に得られていた周期300秒での日本海沿岸や中央脊梁で海岸線に平行なベクトルは消失した。周期300~10000秒の間でもそのような特徴は見られない。周期10000秒では三陸側のベクトルは0に近い値を取る。

(4) 東北北部の虚部のインダクション・ベクトルが北向き成分を持つ原因をマンツルの異常で説明するモデリングを行った。実部のインダクション・ベクトルの研究で結論された高抵抗の地殻に低抵抗のマンツルの直方体が凸状に盛り上がるモデル(Nishida, 1982)でシミュレーションすると、東北北部の虚部のインダクション・ベクトルは寧ろ南向き成分を持つ。逆にマンツルを高抵抗、地殻を低抵抗として、高抵抗のマンツル直方体が凸状に下部地殻に貫入するモデルを試したところ、虚部のインダクション・ベクトルは北向き成分を持つことが分かった。この結果は沈み込み帯の熱対流シミュレーションで、海溝軸が曲がっている場合の淀みの効果で渡島半島付近が低温になっているシミュレーション結果(Wada, 2021)を示唆している可能性があり、当初の仮説と逆の結果となった。

(5) 当初計画していなかった虚部のインダクション・ベクトルに関する成果として、研究中の文献調査で数学的に虚部と実部のインダクション・ベクトルはKramers-Kronichの関係式にあることが分かった。この関係式を使って実部から虚部のインダクション・ベクトルを計算すると観測データの質が分かる。着目している東北地方北部(秋田、岩手県)の虚部インダクション・ベクトルの観測データは実部と良く整合していてデータの質が高いことが確認できた。一方で東北地方中部(宮城県、山形県)では実部から計算した虚部のインダクション・ベクトルの残差が大きく、データの質が低いことが分かった。但し以上は周期5000秒以上の傾向で、5000秒以下のデータはすべての領域で良質なデータであることも確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 市來雅啓、海田俊輝、小川康雄
2. 発表標題 東北地方のインダクションベクトルと虚部のインダクションベクトルについて
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市來雅啓、海田俊輝、小川康雄、白井嘉哉
2. 発表標題 東北地方の虚部インダクションベクトルの因果律の検証と海底地形及び海岸線効果の影響について
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Ichiki, Toshiki Kaida, Yasuo Ogawa, Yoshiya Usui
2. 発表標題 Revisiting strait, coastline and oceanic effects of induction vector: From the viewpoint of quadrature-phase induction vectors in NE Japan
3. 学会等名 American geophysical union, fall meeting 2022. (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------